

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



⑯ BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑯ Patentschrift

⑯ DE 196 50 112 C 1

⑯ Int. Cl. 6:

G 01 F 1/74

G 01 F 1/60

G 01 P 5/08

G 01 N 22/00

- ⑯ Aktenzeichen: 196 50 112.1-52  
 ⑯ Anmeldetag: 3. 12. 96  
 ⑯ Offenlegungstag:  
 ⑯ Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 20. 5. 98

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Wagner International AG, Altstätten, CH

⑯ Vertreter:

BOEHMERT & BOEHMERT, 28209 Bremen

⑯ Erfinder:

Adams, Horst, Dr., 88149 Nonnenhorn, DE; Seitz, Kurt, Widnau, CH

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE	44 06 046 A1
DE	33 16 328 A1
US	48 07 480
EP	02 68 399 A2
EP	2 97 309 A2
JP	58-1 91 517 A
JP	03-1 25 924 A

⑯ Einrichtung und Verfahren zum Messen eines Pulver-Massestromes

⑯ Die Erfindung schlägt eine Einrichtung zum Messen eines Pulver-Massestroms in einem Pulver-Gas-Gemisch während der Förderung durch eine Förderleitung vor, welche eine Geschwindigkeitsmeßvorrichtung für das Pulver-Gas-Gemisch, eine Massenmeßvorrichtung für die Pulvermasse pro Volumeneinheit sowie eine Rechenvorrichtung zum Berechnen des Pulver-Massestroms aus der gemessenen Geschwindigkeit, der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit und den Abmessungen der Förderleitung aufweist. Die Massenmeßvorrichtung weist einen Mikrowellenresonator sowie Mittel zum Erfassen der Resonanzfrequenz und/oder der Mikrowellenamplitude des Mikrowellenresonators auf. Der Mikrowellenresonator hat die Form einer Spule, welche außen auf die Förderleitung aufgebracht ist. Die Erfindung schlägt ferner ein Verfahren zum Messen des Pulver-Massestroms in einer Förderleitung vor, bei dem für die Messung der Pulvermasse pro Volumeneinheit eine Bezugsresonanz bei einem bekannten Pulver-Massestrom ermittelt wird, zwei Meßfrequenzen zu beiden Seiten der Bezugsresonanz eingestellt werden, für einen zu messenden Pulver-Massestrom die Resonatorspannung bei den eingestellten Meßfrequenzen gemessen und deren Differenz gebildet wird, und aus der Spannungsdifferenz die Verschiebung der Resonanzfrequenz ermittelt wird.

DE 196 50 112 C 1

DE 196 50 112 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung und ein Verfahren zum Messen eines Pulver-Massenstromes in einem Pulver-Luft-Gemisch während der Förderung des Pulver-Luft-Gemisches durch eine Förderleitung gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1 bzw. von Patentanspruch 7. Ein solche Vorrichtung und ein derartiges Verfahren sind aus der DE-A-44 06 046 bekannt.

Zur Versorgung v n Pulv rbeschichtungsgeräten, beispielsweise in elektrostatischen Beschichtungsanlagen, mit Beschichtungspulver wird das Pulver fluidisiert, d. h. das Pulver wird mit einem Gas, vorzugsweise Luft, durchsetzt, um ein Pulver-Luft-Gemisch zu bilden, und dieses Pulver-Luft-Gemisch wird durch Förderleitungen den Beschichtungsgeräten zugeführt. Dabei kann es notwendig werden, die tatsächlich geförderte und ausgebrachte Pulvermenge pro Zeiteinheit, d. h. den Pulver-Massenstrom [g/min], während des Betriebes der Beschichtungsanlage zu ermitteln, um beispielsweise den Pulver-Massenstrom auf einen gewünschten Wert einzustellen oder um einen eingestellten Wert erhalten zu können.

Bei Pulverbeschichtungsanlagen nach dem Stand der Technik war es bisher üblich, die zur Pulverförderung mittels Injektoren oder Venturi-Düsen benötigten Luftdrücke mit Hilfe von Manometern in Bar zu messen oder die zur Förderung benötigten Luftmengen in m<sup>3</sup>/h zu bestimmen.

Sowohl die Messung der Luftdrücke als auch die der Luftmengen liefert jedoch nur einen indirekten und unzuverlässigen Hinweis auf die tatsächlich ausgebrachte Pulvermenge. Wenn beispielsweise ein Pulvervorratsbehälter leer ist, werden gleichwohl die Förderdrücke bzw. Luftmengen angezeigt werden, obwohl kein Pulver mehr ausgebracht werden kann.

In der genannten DE-A-44 06 046 wird vorgeschlagen, zur Bestimmung des Pulver-Massenstroms zwei Parameter zu messen, nämlich

- die Geschwindigkeit V des Pulver-Luft-Gemisches in der Förderleitung in m/sec und
- die Pulvermasse pro Volumeneinheit M<sub>V</sub> in der Förderleitung in g/cm<sup>3</sup>.

Aus diesen beiden Parametern V und M<sub>V</sub> ergibt sich in Verbindung mit den als bekannt vorausgesetzten Abmessungen der Förderleitung, insbesondere mit dem Förderleitungsquerschnitt Q, der geförderte und ausgebrachte Pulver-Massenstrom, d. h. die Pulvermenge pro Zeiteinheit M<sub>T</sub> in g/min zu:

$$M_T \text{ [g/min]} = V \text{ [m/sec]} \cdot M_V \text{ [g/cm}^3\text{]} \cdot Q \text{ [cm}^2\text{]} \cdot 6000$$

Gemäß dieser Druckschrift erfolgt die Messung der Geschwindigkeit mittels zweier mit Abstand zueinander angeordneter Meßelektroden, welche von dem geförderten Pulver-Gas-Gemisch erzeugte Ladungsschwankungen an der Förderleitung erfassen. Die Messung der Pulvermasse pro Volumeneinheit erfolgt mit Hilfe eines Mikrowellenresonators, welcher eine Änderung der Dielektrizitätskonstante und/oder der Mikrowellenabsorption in einem Resonanzvolumen der Förderleitung als eine Verschiebung der Resonanzfrequenz bzw. eine Änderung der Mikrowellenamplitude im Resonator erfaßt.

In der EP-A-297 309 sind ein Verfahren und ein Einrichtung zur Messung und Regelung der Pulvermenge in einer Pulverbeschichtungsanlage beschrieben, mit den Pulvermengen gemessen werden können, welche pro Zeiteinheit einer Sprühbeschichtungseinrichtung zugeführt werden. Bei

dem Verfahren wird die Dichte des Pulvers im Pulver-Gas-Strom von einer Strahlenmeßeinrichtung gemessen, die Gasmenge pro Zeiteinheit im Pulver-Gas-Strom wird ermittelt und die geförderte Pulvermenge pro Zeiteinheit wird aus der Gleichung c = a · b bestimmt.

In der US-A-4,807,480 wird ein Verfahren zum Messen der Durchflußrate eines Luft-Pulver-Gemisches beschrieben, bei dem die Geschwindigkeit des Pulver-Luft-Gemisches mit Hilfe von mit Abstand angeordneten Sensors erfaßt wird, welche Ladungsschwankungen im Pulver-Luft-Gemisch erfassen. Hierzu wird von einer Korona-Nadel Ladung in das Pulver-Luft-Gemisch injiziert, welche dann von den Sensoren erfaßt wird.

In der JP-A-3-125924 ist ein Durchflußmesser für einen Pulverstrom offenbart, der einen Tracer-Stoff in einen Pulverstrom einbringt und zwei Sätze von Mikrowellen-Gebrem- und -Empfängern verwendet, um den Pulver-Massenstrom zu ermitteln.

Ferner ist in der DE-A-33 16 328 ein Hohlraumresonator für die Massenmessung eines Flüssigkeitsstromes beschrieben. Die Resonanz wird dabei in einem Mikrowellen-Hohlraum erzeugt, wobei Hohlraum-Moden entstehen. Die Mikrowellenenergie wird durch H-Felder ein- und ausgekoppelt. Der Resonator arbeitet in einem Frequenzbereich von 1–20 GHz, wobei die geometrischen Abmessungen des Hohlraumes die Resonanzfrequenz bestimmen. Dadurch erhält man eine relativ große, unflexible Struktur. Zusätzlich hat der dort beschriebene Hohlraumresonator den Nachteil einer relativ großen Temperaturempfindlichkeit wegen der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der für den Resonatorkörper verwendeten Metalle.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Einrichtung und in Verfahren vorzusehen, mit denen in einer Pulverbeschichtungsanlage während des Betriebs der Anlage der geförderte Pulver-Massenstrom und die ausgebrachte Pulvermenge genauer und weniger störungsanfällig als beim Stand der Technik gemessen werden können.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Einrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 1 und ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 8 gelöst.

Die Erfindung sieht eine Einrichtung zum Messen eines Pulver-Massenstromes in einem Pulver-Gas-Gemisch während der Förderung des Pulver-Gas-Gemisches durch eine Förderleitung vor, welche die folgenden Merkmale aufweist: eine Geschwindigkeitsmeßvorrichtung zum Messen der Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches in der Förderleitung; eine Massenmeßvorrichtung zum Messen der Pulvermasse pro Volumeneinheit in einem Abschnitt der Förderleitung, die einen Mikrowellenresonator sowie Mittel zum Erfassen der Resonanzfrequenz und/oder der Mikrowellenamplitude des Mikrowellenresonators aufweist und aus der erfaßten Resonanzfrequenz und/oder Mikrowellenamplitude die Pulvermasse im Resonanzvolumen ableitet; und eine Rechenvorrichtung zum Berechnen des Pulver-Massenstromes aus der gemessenen Geschwindigkeit, der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit und den Abmessungen der Förderleitung.

Gemäß eines ersten Aspekts der Erfindung ist der Mikrowellenresonator in Form einer Helix ausgebildet. Dabei handelt es sich im Prinzip um eine Spule, die außen auf die elektrisch nicht-leitende Förderleitung aufgebracht ist.

Dies Spule wird durch ein hochfrequente Wechselspannung (im Mikrowellennbereich) zur Resonanz gebracht. Der Vorteil der Resonanzmessung mit einem Helixresonator, gegenüber z. B. dem im Stand der Technik verwendeten Hohlraumresonator, liegt zunächst in der wesentlich geringeren Baugröße, die es ermöglicht, den Sensor direkt in die Sprühpistole einer Pulverbeschichtungsanlage zu integrieren. Fer-

ner läßt sich mit einem Helixresonator eine besonders scharfe Resonanz erzeugen und somit eine bessere Güte erzielen. Durch die Zusammenwirkung dieser beiden Effekte ergibt sich eine größere Genauigkeit und Empfindlichkeit für die Messung der Pulverdichte bzw. der Pulvermasse pro Volumeneinheit.

Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist die Spul des Helixresonators nicht einfach als Draht auf die Förderleitung gewickelt, sondern als Metallschicht auf die Förderleitung aufgedampft. Da beim Aufdampfen eines metallenen Dünnfilms eine Helix- oder Spulenstruktur mit sehr wenig Spulenmaterial erzeugt werden kann, ist selbst bei Verwendung von Gold als Spulenmaterial ein kostengünstiger Helixresonator realisierbar. Gold bietet unter den Edelmetallen die beste Korrosionsbeständigkeit, und es kann in Ätz- oder Maskentechniken sehr genau verarbeitet werden, so daß ein sehr präziser Helixresonator mit extrem hoher Güte erzeugt werden kann, was wiederum zu einer optimalen Meßempfindlichkeit führt.

Gemäß eines weiteren Aspekts der Erfindung wird ein Verfahren zum Messen eines Pulver-Massenstromes in einem Pulver-Gas-Gemisch während der Förderung des Pulver-Gas-Gemisches durch eine Förderleitung vorgeschlagen, bei dem die Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches in der Förderleitung gemessen wird; die Pulvermasse pro Volumeneinheit in einem Abschnitt der Förderleitung gemessen wird, indem eine Verschiebung der Resonanzfrequenz in einem an der Förderleitung angeordneten Mikrowellenresonator erfaßt wird; und aus der gemessenen Geschwindigkeit, der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit und vorbekannten Abmessungen der Förderleitung der Pulver-Massenstrom durch die Förderleitung berechnet wird. Bei der Messung der Pulvermasse pro Volumeneinheit wird eine Bezugs-Resonanz für einen bekannten Bezugs-Pulver-Massenstrom ermittelt, zwei Meßfrequenzen werden zu beiden Seiten der Bezugs-Resonanz eingestellt, für einen zu messenden Pulver-Massenstrom werden die Resonatorspannungen bei den eingestellten Meßfrequenzen gemessen und deren Differenz gebildet, und aus der Spannungsdifferenz wird die Verschiebung der Resonanzfrequenz ermittelt.

Aus dem Stand der Technik, insbesondere der DE-A-44 06 046, war bekannt, die Verschiebung der Resonanzfrequenz als Maß für die Pulverdichte im Rohr auszuwerten. Wie dies ablaufen soll, ist dort nicht offenbart. Die vorliegende Erfindung schlägt daher ein spezielles Verfahren zum Messen der Frequenzverschiebung relativ zu einer Bezugs-Resonanz-Frequenz vor. Der Vorteil dieses neuen Verfahrens liegt insbesondere darin, daß zu keiner Zeit eine absolute Frequenzmessung vorgenommen werden muß.

Im einzelnen wird für das erfundsgemäße Verfahren eine Elektronik eingesetzt, die zunächst bei einem bekannten Bezugs-Pulver-Massenstrom, z. B. bei leerer Förderleitung, einen relativ breiten Frequenzbereich abtastet und eine Resonanz, d. h. eine Spannungsspitze, in diesem Bereich sucht. Wenn die Resonanz gefunden ist, mißt die Elektronik die Spannung  $U_{max}$  im Maximum der Resonanz und setzt zwei Marken oder Meßfrequenzen symmetrisch zu diesem Maximum; bei einer speziellen Ausführungsform können diese Marken z. B. bei etwa der Hälfte  $U_{1/2}$  der maximalen Amplitude der Resonanz, jeweils links und rechts vom Maximum gesetzt werden. Dabei spielt weder die absolute Frequenz  $v_0$  der Resonanz noch die absolute Höhe  $U_{max}$  des Spannungsmaximums eine Rolle. Wichtig ist, daß die Amplitudenwerte links und rechts vom Maximum gleich sind.

Ändert sich nun die Dielektrizitätskonstante im Resonator, z. B. durch Einbringen von Pulver in die Förderleitung, verschiebt sich die Resonanzkurve relativ zu den beiden vorher gesetzten Marken. Das heißt, der Amplitudenwert für

die eine Frequenzmarke steigt an, der für die andere fällt ab. Eine Differenzmessung der beiden Spannungswerte wird ergeben, daß die Spannungsdifferenz bei dem Bezugs-Pulver-Massenstrom null ist und bei jedem anderen Pulver-Massenstrom in einem weiten Bereich proportional zur Resonanzfrequenzverschiebung ist. Aus der Verschiebung der Resonanzfrequenz kann dann die Dichte des Pulver-Massenstroms in der Förderleitung auf dem Fachmann bekannte Art abgeleitet werden.

Neben der Tatsache, daß das neue Verfahren keine hochgenaue Messung der absoluten Frequenz erfordert, hat es noch den folgenden weiteren Vorteil. Bei Sprühpausen, also wenn kein Pulver in der Förderleitung ist und den Resonator durchströmt, kann ein automatischer Nullabgleich erfolgen, d. h. die Elektronik setzt die beiden Frequenzmarken neu symmetrisch zur der Maximalamplitude der Resonanz. Auf diese Weise können Frequenzverschiebungen durch Umwelteinflüsse, wie Temperatur und Feuchtigkeit, kompensiert werden.

Die erfundungsgemäße Einrichtung und das Verfahren können selbstverständlich kombiniert werden.

Die Erfindung ist im folgenden anhand bevorzugter Ausführungsformen mit Bezug auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a und 1b eine Gesamtansicht und eine schematische Teil-Schnittdarstellung einer Ausführungsform des erfundungsgemäßen Mikrowellenresonators,

Fig. 2a, 2b, 2c Diagramme der von dem Mikrowellenresonator erzeugten Signale,

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Elektronik-zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 4 eine schematische Darstellung der Geschwindigkeitsmeßvorrichtung der erfundungsgemäßen Einrichtung und

Fig. 5 ein Diagramm der von der Geschwindigkeitsmeßvorrichtung von Fig. 4 erfaßten Signale A und B über der Zeit.

Fig. 1a und 1b zeigen eine Ausführungsform eines Mikrowellenresonators 36 der Massenmeßvorrichtung zur Bestimmung der Pulvermenge pro Volumeneinheit in einer Förderleitung 10.

Die Förderleitung 10 besteht aus einem Glas- oder Keramikrohr, sie kann jedoch auch ein Kunststoffschlauch sein oder eine andere für Beschichtungsanlagen geeignete Förderleitung. Die Förderleitung 10 ist elektrisch nicht-leitend. Sie wird von dem Pulver-Gas-Strom in Richtung der Pfeile in Fig. 1a durchströmt.

Der Resonator 36 weist für die Abschirmung gegen Störfelder einen Metallzylinder 38 auf, welcher den eigentlichen Resonatorteil 44 umgibt. An dem Metallzylinder 38 sind ein HF-Eingang 40 und ein HF-Ausgang 42 zur Einkopplung von Mikrowellen und zum Abnehmen der Resonatorspannung vorgesehen. Mit der HF-Einkopplungsstelle 40 und der HF-Auskopplungsstelle 42 können Koaxialkabel verbunden sein, s. Fig. 1b, um den Mikrowellenresonator mit einer Mikrowellenquelle und einem Spannungsaufnehmer zu verbinden, wie weiter unten mit Bezug auf Fig. 3 noch beschrieben ist.

Im Inneren des abschirmenden Metallzylinders 38 liegt der Resonator 44 in Form einer Helix oder Spule, welche um die Förderleitung 10 gewickelt ist. Der Mikrowellenresonator gemäß der Erfindung kann als um die Förderleitung 10 gewickelte Drahtspule 44 ausgebildet sein. Dieser Resonator hat einen sehr geringen Platzbedarf, so daß er direkt in das Sprühorgan, z. B. die Sprühpistole, einer Beschichtungsanlage integriert werden kann. Ferner läßt sich bei dem helixförmigen Resonator eine sehr genau abgrenzte Resonanz und somit eine hohe Güte erzielen. Dadurch wird die

Empfindlichkeit bei der Messung der Pulverdichte erhöht.

Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist der Helixresonator als Dünnfilm-Metallschicht 44 auf die Förderleitung 10 aufgebracht, insbesondere aufgedampft. Mittels Ätz- oder Maskierungsverfahren wird die Helixform definiert. Als Spulenmaterial wird bevorzugt Gold verwendet, weil dieses sehr korrosionsbeständig ist und gut verarbeitet werden kann. Da bei dem Aufdampfen ein sehr dünnfilms nur wenig Material für die Helix benötigt wird, kann selbst bei Verwendung von Gold als Spulenmaterial ein kostengünstiger Mikrowellenresonator realisiert werden. Die präzise Ausbildung der Helix aus dem Dünnfilm-Goldmaterial ermöglicht eine nochmalige Verbesserung der Spulengüte und eine Optimierung der Meßempfindlichkeit.

Die Grundsätze der Massenmessung mit dem Mikrowellenresonator 36 sind wie folgt:

Ein Teil des von dem Resonator erzeugten Mikrowellenfeldes dringt durch die Wand der Förderleitung 10 in das Pulver-Luft-Gemisch ein. Gemessen werden die Resonanzfrequenz  $v_0$  des Resonators oder seine Güte  $Q$ . Diese Größen sind von folgenden Materialeigenschaften des Mediums im Resonanzbereich abhängig:

- die Dielektrizitätskonstante und
- die Absorption (Verlustfaktor).

Die Änderungen der Dielektrizitätskonstante und der Absorption sind proportional zu Änderungen der Pulvermenge im Resonanzbereich oder Resonanzvolumen, welches einen bestimmten Abschnitt der Förderleitung 10 umfaßt. Daraus ergibt sich, daß eine Änderung der Pulvermenge, d. h. Pulvermasse, im Resonanzvolumen zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz und zu einer Veränderung der Güte und daher der Mikrowellenamplitude führt. In Fig. 2a sind zwei Resonanzkurven  $R_1$ ,  $R_2$  für unterschiedliche Pulvermengen im Resonanzvolumen gezeigt, wobei in Fig. 2a nur die Frequenzverschiebung zwischen den beiden Kurven  $R_1$ ,  $R_2$  gezeigt ist, nicht jedoch die Änderung der Mikrowellenamplitude aufgrund der veränderten Güte. Bei zunehmender Pulvermenge im Resonanzvolumen nimmt die Güte des Mikrowellenresonators ab, so daß die Kurve  $R_2$  tatsächlich flacher verläuft als die Kurve  $R_1$  und eine geringere Amplitude aufweist. Die Amplitudendifferenz ist in Fig. 2a eingezeichnet.

Durch Messen der Resonanzfrequenzverschiebung oder der Mikrowellenamplitudenänderung bei unterschiedlichen Pulvermengen im Resonanzvolumen ist jeweils die Bestimmung der Pulvermengenänderung im Resonanzvolumen als eine relative Massenbestimmung möglich. Eine absolute Massenbestimmung kann durch eine Kalibrierung des Mikrowellenresonators auf eine Bezugs-Resonanzfrequenz und eine Bezugs-Mikrowellenamplitude für eine vorgegebene bekannte Pulvermenge erfolgen. Aufgrund einer Resonanzfrequenzverschiebung oder einer Mikrowellenamplitudenänderung relativ zu der Bezugsfrequenz oder der Bezugsamplitude ist dann die Pulvermenge im Resonanzvolumen relativ zu der vorgegebenen bekannten Pulvermenge bestimmbar, so daß die absolute Pulvermasse pro Volumeneinheit aus der ermittelten Resonanzfrequenzverschiebung oder der Veränderung der Mikrowellenamplitude, bzw. Veränderung der Güte  $Q$ , relativ zu den Bezugsgrößen in geeigneten Auswertungsvorrichtungen ermittelt werden kann.

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Messen des Pulver-Massenstroms und insbesondere der Resonanzfrequenzverschiebung ist im folgenden anhand der Fig. 2b und 2c näher erörtert.

Fig. 2b zeigt die Resonanzkurve des Helix-Mikrowellen-

resonators 36 von Fig. 1a und 1b, welche bei der Frequenz  $v_0$  in Spannungsmaximum  $U_{max}$  hat, wobei im Fall von Fig. 2b die Förderleitung leer ist, d. h. der Pulver-Massenstrom ist null.

- 5 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren tastet eine Elektronik zunächst bei leerer Förderleitung einen voreingestellten, breiten Frequenzbereich ab und sucht eine Resonanz in diesem Bereich, d. h. eine Spannungsspitze. Wenn die Elektronik diese Resonanz oder Spannungsspitze gefunden hat, mißt sie die Spannung  $U_{max}$  im Maximum, welche bei der Resonanzfrequenz  $v_0$  auftritt. Sie setzt anschließend zwei Marken oder Meßfrequenzen zu beiden Seiten der Resonanzfrequenz  $v_0$ , z. B.  $v_{m1}$  und  $v_{m2}$ . Diese Meßfrequenzen  $v_{m1}$ ,  $v_{m2}$  sind symmetrisch zu der Maximalamplitude angeordnet. Bei dem in Fig. 2b gezeigten Fall werden die Frequenzen bei etwa der Hälfte  $U_{1/2}$  der maximalen Amplitude der Resonanz, jeweils links und rechts vom Maximum, eingestellt. Die Absolutfrequenz  $v_0$  der Resonanzspannung sowie das absolute Spannungmaximum  $U_{max}$  der Resonanz (Signalamplitude) sind dabei nicht entscheidend; es muß lediglich darauf geachtet werden, daß die Amplitudenwerte links und rechts vom Maximum bei  $v_{m1}$  bzw.  $v_{m2}$  gleich sind. Das gewählte Beispiel der halben maximalen Resonanzamplitude zur Bestimmung der Meßfrequenzen  $v_{m1}$ ,  $v_{m2}$
- 10 hat den Vorteil, daß bei diesen Meßstellen der Zusammenhang zwischen der Spannungsdifferenz und der Resonanzverschiebung annähernd linear ist; für die Erfindung wichtig ist jedoch nur, daß die Meßfrequenzen links und rechts vom Maximum, symmetrisch zu  $U_{max}$  gesetzt werden.
- 15 20 25 Wenn sich nun die Dielektrizitätskonstante im Mikrowellenresonator ändert, etwa durch Eindringen von Pulver in die Förderleitung, so verschiebt sich die Resonanzfrequenz relativ zu der Bezugs-Resonanzfrequenz, z. B. auf  $v_1$  wie in Fig. 2c. Die Elektronik erfaßt nun die Spannungsamplituden der neuen Resonatorspannung bei den Meßfrequenzen  $v_{m1}$  und  $v_{m2}$ , wobei sich, wie in Fig. 2c dargestellt, eine erhebliche Spannungsdifferenz zwischen den beiden Meßfrequenzen ergibt; d. h. der Amplitudenwert für die eine Frequenzmarke  $v_{m2}$  steigt an, der für die andere Frequenzmarke  $v_{m1}$  fällt ab.

Eine Differenzmessung der Spannungswerte bei den Meßfrequenzen  $v_{m1}$ ,  $v_{m2}$  ergibt bei leerer Förderleitung bzw. bei dem Bezugs-Pulver-Massenstrom die Spannungsdifferenz null, während die Spannungsdifferenz für alle anderen Pulver-Massenströme in einem weiten Frequenzbereich proportional zur Resonanzfrequenzverschiebung ist. Aus der Resonanzfrequenzverschiebung kann, wie oben erörtert, die Pulverdichte in der Förderleitung ermittelt werden.

Eine elektronische Schaltung, oder Elektronik, zum Durchführen der erfindungsgemäßen Messung des Pulver-Massenstroms ist in Fig. 3 allgemein mit 50 bezeichnet. Der HF-Eingang 40 des Mikrowellenresonators 36 ist mit einem einstellbaren HF-Oszillator 52 gekoppelt, der über einen Schalter 54 zwischen der oberen Meßfrequenz  $v_{m2}$  und der unteren Meßfrequenz  $v_{m1}$  umstellbar ist. Diese Frequenzen  $v_{m2}$ ,  $v_{m1}$  sind über Potentiometer 56 bzw. 58 einstellbar. Sie werden, wie oben erörtert, vorab ausgehend von dem Bezugs-Pulver-Massenstrom bestimmt. Der HF-Oszillator 52 kann somit den Mikrowellenresonator 36, der von dem gesuchten Pulver-Massenstrom durchströmt wird, jeweils mit einer der beiden eingestellten Meßfrequenzen anregen.

Bei Anregung des Mikrowellenresonators 36 mit den Meßfrequenzen  $v_{m1}$ ,  $v_{m2}$  entstehen am HF-Ausgang 42 entsprechende Resonatorspannungen, welche in einem Gleichrichter 60 zugeführt werden. Diese Spannungen werden über einen Schalter 62 wahlweise einem Speicher 64 für die höhere Meßfrequenz  $v_{m2}$  und einem Speicher 66 für die niedrigere Meßfrequenz  $v_{m1}$  zugeführt. Der Schalter 54 und

der Schalter 62 werden von einem Takgeber 68 im Gleichakt umgeschaltet, so daß bei Anregung des Mikrowellenresonators 36 mit der niedrigeren Meßfrequenz  $v_{m1}$  die Ausgangsspannung des Resonators 36 dem "unteren" Speicher 66 zugeführt wird und bei Anregung des Mikrowellenresonators 36 mit der höheren Meßfrequenz  $v_{m2}$  die Ausgangsspannung des Resonators 36 dem "oberen" Speicher 64 zugeführt wird. Die gespeicherten Spannungswerte werden in einem Differenzverstärker 70 zugeführt, dessen Ausgangssignal zur weiteren Verarbeitung gemäß dem oben beschriebenen Verfahren an eine nicht gezeigte Verarbeitungseinheit weitergeleitet wird, um aus der Spannungsdifferenz die Verschiebung der Resonanzfrequenz des Mikrowellenresonators 36 relativ zu der Bezugs-Resonanz und daraus die Pulverdichte in dem Meßabschnitt der Förderleitung 10 zu ermitteln.

Das erfundungsgemäße Verfahren hat den großen Vorteil, daß keine hochgenaue Messung der absoluten Resonanzfrequenzen eines bekannten Bezugs-Pulver-Massenstroms und eines gesuchten Pulver-Massenstroms durchgeführt werden müssen. Ferner kann in Sprühpausen, also wenn kein Pulver in der Förderleitung und somit im Resonator ist, ein automatischer Nullabgleich erfolgen; d. h. die Elektronik stellt die beiden Meßfrequenzen wieder symmetrisch zu der Maximalamplitude der Resonanz ein. Auf diese Weise können Frequenzverschiebungen durch Umwelteinflüsse, wie Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen, kompensiert werden. Das Verfahren wird vorzugsweise mit dem oben beschriebenen Helixresonator durchgeführt.

Fig. 4 zeigt schematisch den Aufbau der Geschwindigkeitsmeßvorrichtung. An der Förderleitung 10 sind mit einem vorgegebenen Abstand D zwei Meßelektroden 12, 14 angebracht, welche über Signalleitungen 16, 18 mit einem Verstärker 20 verbunden sind. Die Ausgänge 22, 24 des Verstärkers 20 sind mit einer Meßwert-Auswertungsvorrichtung 26, beispielsweise einem X(t)-Schreiber, verbunden. Bei der in Fig. 4 gezeigten Ausführungsform der Geschwindigkeitsmeßvorrichtung bestehen die Meßelektroden 12, 14 aus Kupferringen, welche um die Förderleitung 10 herumgelegt sind.

Der Abschnitt der Förderleitung 10, bei dem die Meßanordnung mit den Meßelektroden 12, 14 angeordnet ist, ist von einer geerdeten Abschirmung 28 umgeben. Auch die Signalleitungen 16, 18 und der Verstärker 20 weisen geerdete Abschirmungen 30, 32 bzw. 34 auf. Der Verstärker 20 der gezeigten Ausführungsform ist ein empfindlicher Meßverstärker.

Die Geschwindigkeitsmeßvorrichtung arbeitet wie folgt: Die Pulverpartikel des durch die Förderleitung 10 in der Richtung des Pfeiles F transportierten Pulver-Luft-Gemisches laden sich durch Reibung mit dem Kunststoff-Schlauchmaterial elektrostatisch auf. Diese Ladungen influenzieren, oder induzieren, in den beiden in geeignetem Abstand D zueinander angeordneten, an dem Kunststoffschlauch angebrachten Meßelektroden 12, 14 Spannungen, welche über die abgeschirmten Signalleitungen 16, 18 dem empfindlichen Meßverstärker 20 zugeführt werden. Der Verstärker mißt und verstärkt die durch die geladenen Pulverpartikel an den Orten der beiden Elektroden erzeugten Influenzspannungen. Die gemessenen Signale, Signal A von Meßelektrode 12 und Signal B von Meßelektrode 14, sind in Fig. 5 dargestellt. Der zeitliche Verlauf der beiden Signale stimmt weitgehend, zu etwa 97%, überein (Korrelation). Die verstärkten Signale A, B werden von dem Verstärker 20 an die Meßwert-Auswertungsvorrichtung 26 übergeben, welche die zeitlichen Signalverläufe auf dem X(t)-Schreiber anzeigt und auswertet. Da die Signalverläufe weitgehend übereinstimmen, ist die eindeutige Bestimmung der Zeit

spannen zwischen zwei entsprechenden Signal spitzen möglich, so daß aus der Zeitverschiebung oder dem zeitlichen Versatz  $\Delta t$  zwischen den Signalspitzen und dem bekannten Abstand D zwischen den Meßelektroden die Geschwindigkeit V der Pulverpartikel in dem durch die Förderleitung 10 transportierten Pulver-Luft-Gemisch berechenbar ist:  $V = D/\Delta t$

Bei einer modifizierten Ausführungsform der Meßvorrichtung wird die Luft zur Förderung der Pulverpartikel pulsiert, so daß die beiden Meßelektroden an dem Kunststoffschlauch pulsierende Influenzspannungen erfassen. Dadurch ergeben sich anstelle der in Fig. 5 gezeigten weitgehend zufälligen Spannungsschwankungen im wesentlichen periodische Signalverläufe nach Maßgabe der Impulsfrequenz, welchen lediglich ein geringer Rauschanteil überlagert ist. Aus der Zeitspanne zwischen zwei korrespondierenden Signalspitzen und dem bekannten Abstand D zwischen den Meßelektroden 12, 14 kann dann die Geschwindigkeit V der Pulverpartikel, wie oben beschrieben, bestimmt werden. Der Vorteil dieser modifizierten Ausführungsform der Meßvorrichtung und des Meßverfahrens liegt darin, daß der Meßverstärker 20 schmalbandig auf die Modulationsfrequenz abgestimmt werden kann, so daß eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses erreicht wird.

Bei einer weiteren Ausführungsvariante kann der Nachweis der pulsierenden Ladungen mit Hilfe eines Lock-in Verstärkers zusätzlich phasenempfindlich erfolgen. Die Signale werden dann einerseits frequenzselektiv, schmalbandig auf die Modulationsfrequenz abgestimmt verstärkt, wobei der Lock-in Verstärker andererseits auf eine feste Phase relativ zu dem Anregungsimpuls eingestellt, oder "eingerastet", werden kann, wobei diese feste Phase aufgrund der bekannten Abmessungen und der Dimensionierung des Geschwindigkeitsmeßsystems bestimmbar ist. Dadurch wird eine weitere Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses erreicht.

Aus der gemessenen Geschwindigkeit des Pulver-Luft-Gemisches V, der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit  $M_V$  und dem Querschnitt Q der Förderleitung 10 kann dann in einer nicht gezeigten Rechenvorrichtung durch Multiplikation der Pulver-Massenstrom in der Förderleitung, d. h. die pro Zeiteinheit geförderte Pulvermenge, berechnet werden.

Die in der vorstehenden Beschreibung, der Zeichnung und den Ansprüchen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

#### Patentansprüche

1. Einrichtung zum Messen eines Pulver-Massenstromes in einem Pulver-Gas-Gemisch während der Förderung des Pulver-Gas-Gemisches durch eine Förderleitung, mit einer Geschwindigkeitsmeßvorrichtung (12-26) zum Messen der Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches in der Förderleitung (10), einer Massenmeßvorrichtung (36, 40; 38, 42) zum Messen der Pulvermasse pro Volumeneinheit in einem Abschnitt der Förderleitung (10), die einen Mikrowellenresonator (36) sowie Mittel (50) zum Erfassen einer Änderung der Resonanzfrequenz und/oder der Mikrowellenamplitude des Mikrowellenresonators (36) aufweist und aus der erfaßten Resonanzfrequenz und/oder der Mikrowellenamplitude die Pulvermasse in dem Förderleitungabschnitt ableitet, und einer Rechenvorrichtung zum Berechnen des Pulver-Massenstromes aus der gemessenen Geschwindigkeit, der gemessen

- Pulvermasse pro Volumen in  $\text{it}$  und den Abmessungen der Förderleitung (10), dadurch gekennzeichnet, daß der Mikrowellenresonator (36) eine Spule (44) aufweist, die außen auf die Förderleitung (10) aufgebracht ist. 5
2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule (44) als Dünnsfilm-Helix auf die Förderleitung (10) aufgebracht ist. 10
3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Dünnsfilm-Helix (44) aus einer aufgedampften Edelmetallschicht, insbesondere aus Gold, hergestellt ist. 15
4. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule eine auf die Förderleitung (10) gewickelte Drahtspule (44) ist. 15
5. Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Elektronik (50) zum Erfassen und Speichern einer Bezugs-Resonanzfrequenz  $v_0$  für einen bekannten Bezugs-Pulver-Massenstrom, zum Einstellen von zwei Meßfrequenzen 20  $v_{m1}, v_{m2}$  zu beiden Seiten dieser Bezugs-Resonanzfrequenz und zum Erfassen und Vergleichen der Resonatorspannungen bei den eingestellten Meßfrequenzen für einen zu messenden Pulver-Massenstrom, um aus der Spannungsdifferenz die Pulvermasse pro Volumeneinheit des zu messenden Pulver-Massenstroms abzuleiten. 25
6. Einrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Geschwindigkeitsmeßvorrichtung zwei mit Abstand zueinander 30 an der Förderleitung (10) vorgesehene Meßeletroden (12, 14) aufweist, die von dem geförderten Pulver-Gas-Gemisch erzeugten Ladungsschwankungen an der Förderleitung (10) erfassen und aus den erfaßten Ladungsschwankungen die Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches ermitteln. 35
7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeletroden die Förderleitung (10) umgebende Ringelektroden (12, 14) sind und daß die Meßwertverarbeitungsvorrichtung einen Meßverstärker (20) zum Verstärken der Spannungssignale und eine Auswertungsvorrichtung (26) aufweist, welche den zeitlichen Versatz zwischen Extremwerten der verstärkten Spannungssignale erfaßt. 40
8. Verfahren zum Messen eines Pulver-Massenstromes 45 in einem Pulver-Gas-Gemisch während der Förderung des Pulver-Gas-Gemisches durch eine Förderleitung (10), bei dem die Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches in der Förderleitung (10) gemessen wird, die Pulvermasse pro Volumeneinheit in einem Abschnitt 50 der Förderleitung (10) gemessen wird, indem eine Verschiebung der Resonanzfrequenz in einem an der Förderleitung angeordneten Mikrowellenresonator (36) erfaßt wird, und aus der gemessenen Geschwindigkeit, der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit und 55 vorbekannten Abmessungen der Förderleitung (10) der Pulver-Massenstrom berechnet wird, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Messung der Pulvermasse pro Volumeneinheit eine Bezugs-Resonanzfrequenz  $v_0$  für einen bekannten Bezugs-Pulver-Massenstrom ermittelt wird, zwei Meßfrequenzen  $v_{m1}, v_{m2}$  zu beiden Seiten 60 der Bezugs-Resonanzfrequenz eingestellt werden, für einen zu messenden Pulver-Massenstrom die Resonatorspannungen bei den ingestellten Meßfrequenzen gemessen und deren Differenz gebildet wird und aus 65 der Spannungsdifferenz die Verschiebung der Resonanzfrequenz relativ zu der Bezugs-Resonanzfrequenz ermittelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Bezug-Resonanzfrequenz in leerer Förderleitung (10) ermittelt wird. 70
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß zum Ermitteln der Bezug-Resonanzfrequenz für den bekannten Pulver-Massenstrom die maximale Spannungsamplitude  $U_{\max}$  des Resonators (36) erfaßt wird, und daß die Meßfrequenzen bei in  $m$  vorggebenen Bruchteil  $U_{1/2}$  der maximalen Amplitude eingestellt werden. 75
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßfrequenzen etwa bei der halben maximalen Spannungsamplitude eingestellt werden. 80
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Geschwindigkeitsmessung an zwei voneinander entfernten Meßstellen (12, 14) von dem geförderten Pulver-Gas-Gemisch an der Oberfläche der Förderleitung (10) erzeugte Ladungsschwankungen erfaßt werden, die erfaßten Ladungsschwankungen in Spannungssignale umgewandelt werden und die Geschwindigkeit des Pulver-Gas-Gemisches aus dem zeitlichen Versatz zwischen diesen Spannungssignalen und dem Abstand der Meßstellen ermittelt wird. 85
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Pulver-Gas-Gemisch pulsierend durch die Förderleitung (10) gefördert wird, um erfaßbare Ladungsschwankungs-Maxima und Minima zu erzeugen. 90
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Pulver-Massenstrom (MT) als Produkt der gemessenen Geschwindigkeit ( $V$ ), der gemessenen Pulvermasse pro Volumeneinheit ( $M_V$ ) und des Querschnitts ( $Q$ ) der Förderleitung berechnet wird:

$$MT = V \cdot M_V \cdot Q$$

15. Beschichtungspistole mit einer Förderleitung zum Transportieren eines Pulver-Gas-Gemisches und mit einer Einrichtung zum Messen eines Pulver-Massenstromes nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung in die Beschichtungspistole integriert ist.

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

---

**- Leerseite -**

Fig. 2a

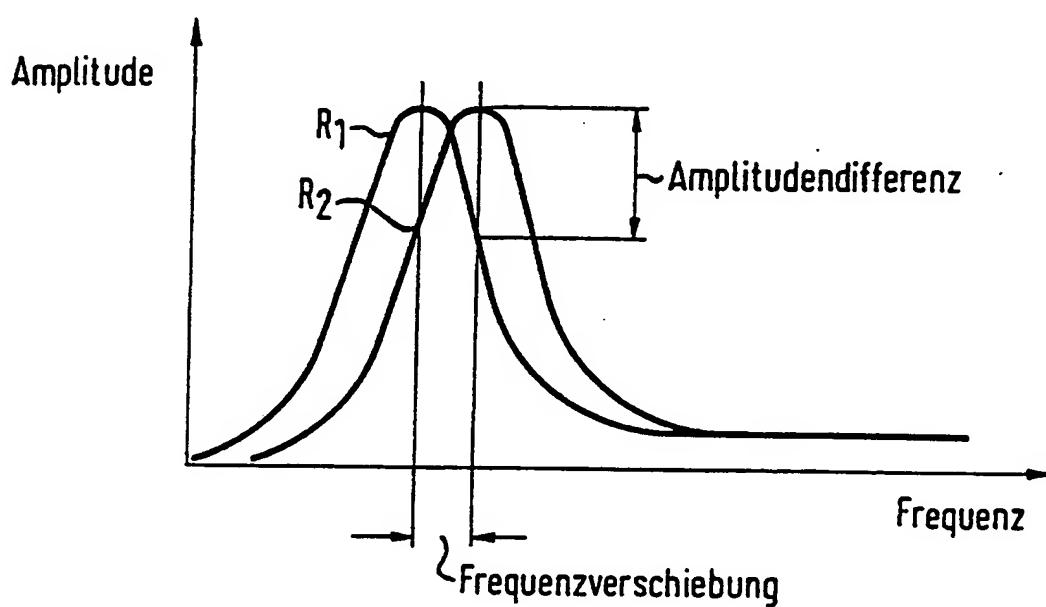


Fig. 4

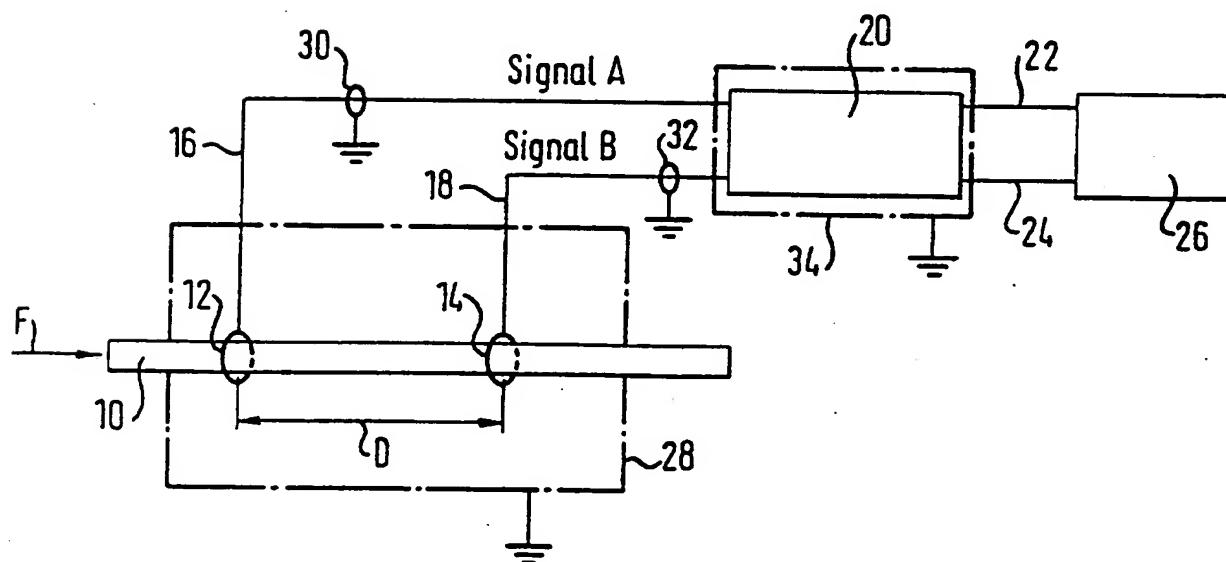
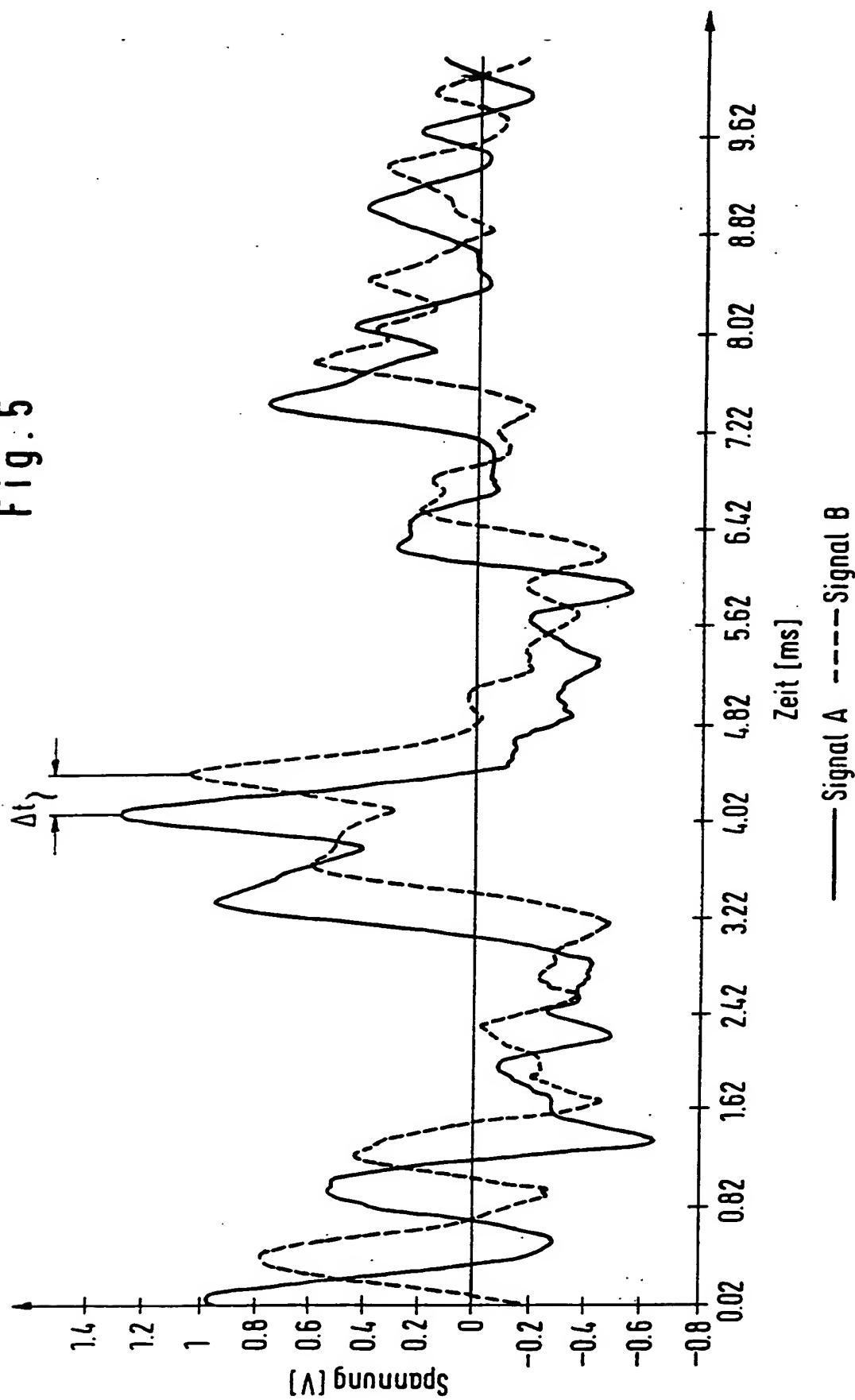


Fig. 5



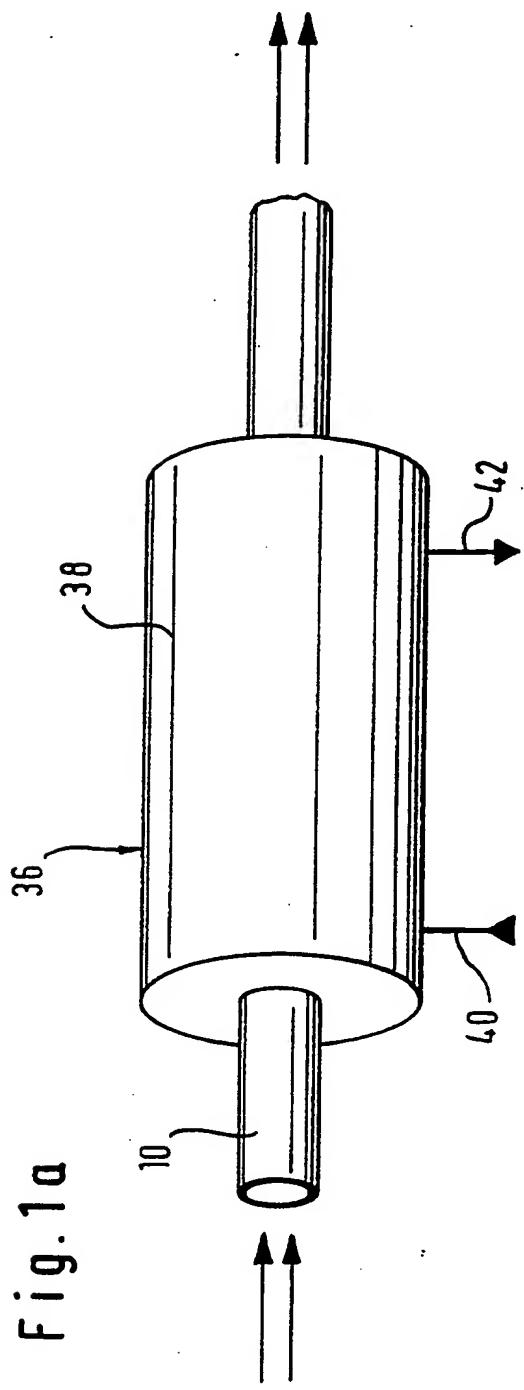


Fig. 1a

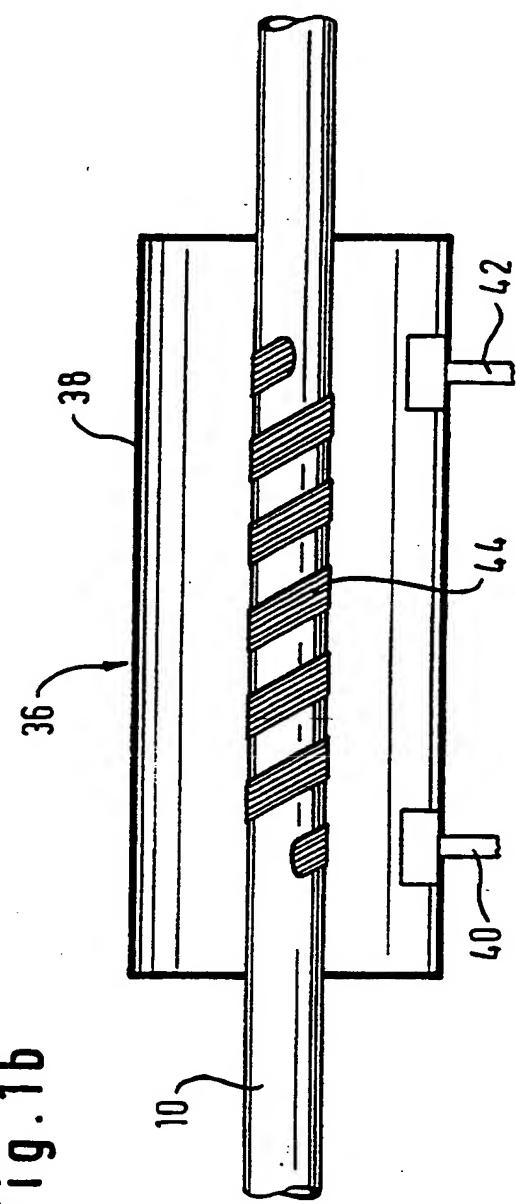


Fig. 1b

Fig. 2 c

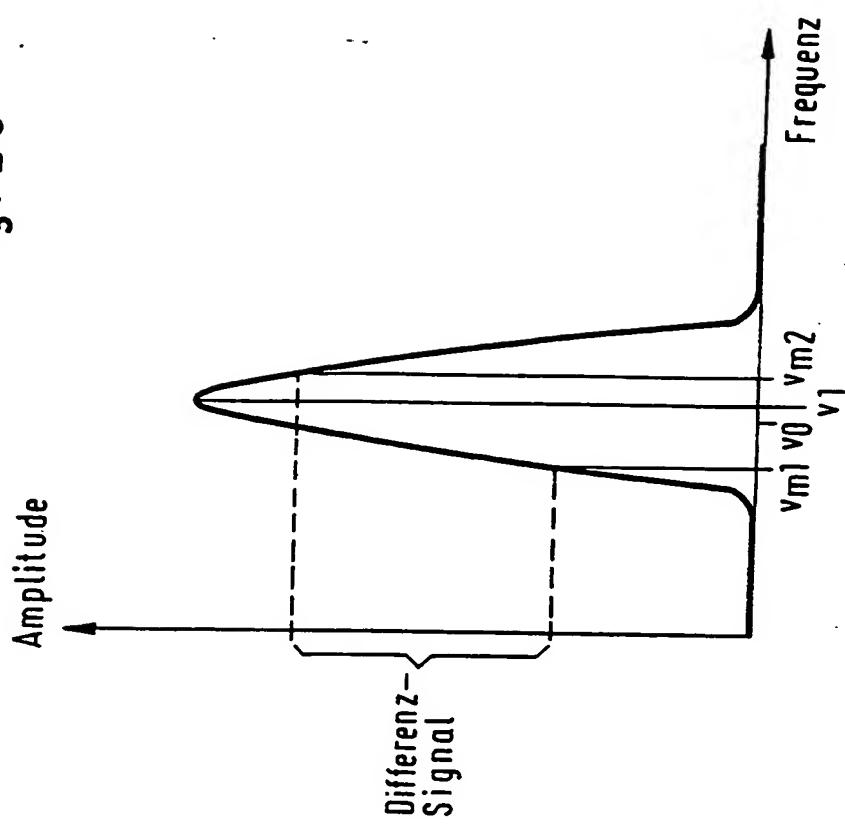


Fig. 2 b

